

Sujet de thèse

École doctorale EEA de Lyon

Merci de compléter l'ensemble des rubriques et de lire les notes de bas de page.

Etablissement d'inscription ¹ : INSA de Lyon
École doctorale : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Scorletti Gérard
Intitulé du doctorat ² : Automatique
Sujet de la thèse : Commande de systèmes en présence de références et de perturbations périodiques par une approche retard
Unité de recherche ³ : Laboratoire Ampère dirigé par Bruno Allard
Directeur/trice de thèse : M. Wilfrid Marquis-Favre
Co-directeur/trice de thèse ⁴ : aucun
Co-directeur/trice de thèse en entreprise : aucun

¹ A impérativement choisir dans la liste suivante : Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1

² A impérativement choisir dans la liste suivante : Automatique // Electronique, Micro et Nano-électronique, Optique et Laser // Génie Electrique // Ingénierie pour le vivant Traitement du signal et de l'Image)

³ A impérativement choisir dans la liste suivante : Laboratoire Ampère, CITI, CREATIS, INL, LAGEP, LGEF

⁴ Un/une co-encadrant-e n'est pas nécessairement co-directeur/trice de thèse puisque pour remplir ce rôle, il est nécessaire d'être habilité à diriger des recherches (pour plus de précision, voir le règlement intérieur de l'ED EEA, section 3.

Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels⁵ : aucune

Domaine et contexte scientifiques :

Régulation de sortie dans les systèmes physiques

Le problème de la régulation de sortie est un problème central en Automatique car il permet de traiter le rejet de perturbation et le suivi de trajectoire en adoptant un point de vue unifié. De nombreuses approches ont été utilisées pour apporter des solutions à ce problème. On pourra citer notamment l'approche par modèle interne qui est une approche constructive et robuste pour les systèmes LTI, la méthode de l'inversion de modèle, la commande répétitive (« repetitive control ») ou bien encore l'approche par optimisation entrée/sortie. Ces approches apportent chacune des solutions partielles au problème de régulation de sortie. La commande répétitive est globalement limitée aux représentations fréquentielles, le modèle interne ne prend en compte que des modèles simples des signaux exogènes, l'inversion de modèle est peu robuste aux incertitudes et finalement l'approche H_{∞} « élude » les propriétés structurelles du système et ne permet pas le rejet ou le suivi asymptotique de perturbations périodiques avec un régulateur simple.

Mots-clés : commande répétitive, régulation de sortie, modèle interne, approche d'état, systèmes à retard.

Objectifs de la thèse :

1) Uniformisation des approches existantes de régulation de sortie

Ce premier objectif consiste à identifier un cadre général pour les différentes approches mentionnées dans le paragraphe précédent. On se concentra en particulier sur la commande répétitive et le modèle interne et on étudiera les équivalences en terme de commandes synthétisées et de robustesse.

2) Étendre la notion de modèle interne pour une classe d'exosystème modélisée par des signaux à retard

Cette formulation peut aussi être vue comme une généralisation de la méthode « repetitive control » à l'approche d'état. Cette nouvelle formulation permettra, d'une part, de traiter une plus grande classe de signaux exogènes que ceux traités dans l'approche classique du modèle interne de Francis et Wonham. D'autre part, cela permettra d'étendre la méthode « repetitive control » à une classe de systèmes plus large. Cette approche permettra aussi d'utiliser des outils

⁵ Hors contrats doctoraux fléchés UMI par l'établissement, les sujets de thèse en cotutelle ne sont pas acceptés.

issus de la théorie des systèmes à retard et des systèmes périodiques notamment pour estimer la période des signaux exogènes.

2) Fournir une méthode de réglage permettant d'assurer un compromis entre les performances en régime transitoire et en régime permanent

La méthode de commande par modèle interne propose des conditions nécessaires d'existence de solutions au problème de la régulation de sortie. Ces conditions sont obtenues en considérant seulement les performances en régime permanent. Deux perspectives sont envisagées ici : i) parmi les régulateurs qui remplissent les conditions nécessaires lesquels permettent de garantir des performances en régime permanent optimales ii) si aucun des régulateurs ne permet d'assurer les performances nécessaires en régime transitoire est-il possible de dégrader ou relaxer les conditions nécessaires ? On pourra aussi essayer de prendre en compte des contraintes sur l'entrée, l'état et la sortie dans cette analyse.

Cet aspect s'inscrit pleinement dans l'axe de recherche autour de la commande hiérarchisée du Laboratoire Ampère. Il est donc attendu de collaborer avec d'autres membres du Laboratoire Ampère sur cet objectif.

3) Implémenter et tester les algorithmes sur la plate-forme « ctrl-elec » du Laboratoire Ampère

Dans le domaine de l'électronique de puissance, des harmoniques indésirables viennent souvent perturber les grandeurs à réguler. C'est par exemple le cas des redresseurs électriques dans lesquels les commutations des interrupteurs provoquent des ondulations de tension. De même, les grandeurs à suivre sont souvent périodiques (sinusoïdales). Le montage à correcteur de facteur de puissance qui permet de limiter l'injection sur le réseau de pics de courant nécessite le suivi d'une trajectoire sinusoïdale. Il est alors nécessaire de proposer des méthodes de commande permettant d'atténuer ou de rejeter parfaitement des perturbations périodiques et de suivre précisément des trajectoires périodiques le tout avec des régimes transitoires suffisamment rapides. Ce troisième objectif porte sur la vérification expérimentale des méthodes développées dans les points précédents. Après une validation sur une plate-forme de prototypage rapide, il est attendu que les algorithmes soient aussi testés sur des modules bas coût type micro contrôleurs.

Verrous scientifiques :

Le verrou scientifique majeur est celui de trouver une formalisation appropriée pour combiner un modèle algébrique à retard du signal exogène avec un système modélisé par une équation différentielle linéaire puis de donner des conditions nécessaires d'existence de régulateurs.

Le second verrou est de caractériser parmi les solutions de l'équation du régulateur de Wonham celles qui permettraient de garantir certaines propriétés du régime transitoire. On devra donc mettre en avant un critère approprié puis une méthode de minimisation sous contraintes.

Le troisième verrou concerne l'étude des propriétés de robustesse de la régulation lorsque l'exosystème est inconnu ou partiellement connu. Les techniques développées à ce jour exploitent des algorithmes adaptatifs pour l'identification paramétrique de l'exosystème. La robustesse des performances atteignables dans le cas d'exosystèmes inconnus est cependant un verrou scientifique.

Contributions originales attendues :

La première contribution sera d'apporter un cadre uniforme aux différentes solutions du problème de la régulation de sortie. Cela permettra d'identifier les points clés de chaque méthode et de pouvoir caractériser les points communs et les différences en termes de synthèse de régulateur et de robustesse notamment.

La seconde contribution attendue sera d'étendre la formulation du problème de la régulation de sortie en utilisant la théorie des systèmes à retards pour modéliser les signaux exogènes. Dans un second temps, on formulera des conditions pour lesquelles le problème peut être résolu. Il s'agira d'un résultat original car il combinera la théorie des systèmes à retards et celle de la régulation de sortie pour étendre la classe des signaux exogènes que l'on peut considérer.

La troisième contribution attendue est celle de proposer une méthode de réglage qui permettra de prendre en compte non seulement les performances du régime permanent mais aussi celle du régime transitoire dans la formalisation du modèle interne. Cette dernière contrainte est très souvent reléguée au second plan dans les articles de théorie de la commande or elle est très souvent cruciale en pratique.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

La thèse commencera par une familiarisation avec la bibliographie sur la commande par modèle interne et sur la commande répétitive. En parallèle et afin de bien comprendre les applications visées, des exemples basiques sur l'électronique de puissance seront mis en place en simulation en utilisant Matlab/Simulink. Cela débouchera sur une formulation d'un cadre général qui permettra une hiérarchisation des méthodes utilisées (modèle interne, commande répétitive, inversion, optimisation entrée/sortie) En ce qui concerne l'approche retard, les outils formels tels que les fonctionnels de Lyapunov Krasovskii et les fonctions de Lyapunov Razumikhin devront être pris en main afin de pouvoir proposer rapidement des critères pertinents. Les validations expérimentales auront lieu de préférence tout au long de la thèse. En effet, la démarche scientifique visée est celle d'un enrichissement mutuel entre théorie/simulation/expérimentation. La succession linéaire de ces trois étapes n'est pas pertinente et des aller-retours constants seront préférés afin que la partie expérimentale vienne aussi enrichir la théorie.

Encadrement scientifique :

- **Description du comité d'encadrement :** [à compléter avec le rôle dans l'encadrement scientifique (en termes de compétences scientifiques, etc.) et le pourcentage d'implication du directeur de thèse ⁶ et des autres membres du comité⁷]

Nom Prénom	Labo / Equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement %
Wilfrid Marquis-Favre	Ampère/MIS	Modélisation des systèmes électrique	20
Vincent Léchappé	Ampère/MIS	Approche retard, observation de perturbation et de retard	50
Michael Di Loreto	Ampère/MIS	Régulation de sortie	30

⁶ Le directeur de thèse doit être un HdR rattaché à l'ED EEA ou en passe de le devenir avant juin 2019 ou bénéficiaire d'une dérogation du Conseil Scientifique lors du dépôt du sujet de thèse.

⁷ Dans le cas d'un comité d'encadrement réparti sur plusieurs établissements, la plus grande partie de l'encadrement est effectuée par des membres de l'établissement. Si l'encadrement de la thèse implique des membres hors de l'ED EEA, la part de l'encadrement des membres ED doit être très supérieur à 50%.

- Le comité d'évaluation de l'HCERES ayant demandé à l'école doctorale de limiter la taille du comité d'encadrement à deux membres (directeur de thèse compris), il est impératif de ne proposer des comités d'encadrement de taille plus importante que si cela est absolument nécessaire⁸ et **de le justifier soigneusement**.

Michaël Di Loreto devrait obtenir son HDR pendant la thèse. Dès qu'il aura son HDR il deviendra directeur de thèse et Wilfrid Marquis Favre se retirera du comité d'encadrement.

- **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s)** (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (**pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)**) :

Intégration à 100 % au sein de l'équipe APEP du département MIS du Laboratoire Ampère.

Financement de la thèse : Contrat doctoral de l'établissement d'inscription

Profil du candidat recherché (prérequis) :

Le candidat recherché sera issu d'un master à dominante automatique ou diplôme équivalent. Des compétences à la fois en simulation et en expérimentations (plate-forme de prototypage rapide) seront les bienvenues. Une appétence pour les aspects théoriques sera demandée. Cependant aucun prérequis sur la commande par modèle interne ou le « repetitive control » ne seront nécessaires.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

Les travaux de thèse devront faire l'objet de publications dans des revues internationales de qualité. Les résultats intermédiaires pourront être présentés à la communauté scientifique lors de conférences et de workshops.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat :

Des compétences théoriques dans des domaines variés de l'Automatique seront développées. En effet le sujet requiert une maîtrise des domaines de la régulation de sortie, des systèmes à retards, des systèmes périodiques, ...

⁸ Un certain nombre de commissions type CNU ne reconnaissent un co-encadrement qu'au-delà d'un certain pourcentage. Souvent l'encadrement est considéré comme effectif si > 30%.

Des compétences techniques seront aussi développées lors de la validation expérimentale : prise en main des outils de prototypage rapide dans un premier temps puis programmation d'architectures cibles telles que les micro-contrôleurs dans un second temps. Ce deuxième aspect permettra de monter en compétence sur la partie conversion en virgule fixe, échantillonnage ...

D'autres part, des compétences à la fois théorique et pratique dans le domaine de l'électronique de puissance seront acquises tout au long de la thèse.

Perspectives professionnelles après le doctorat :

D'après le large spectre de compétences mentionnés ci-dessus, la thèse pourra permettre des débouchés professionnels variés selon la sensibilité de l'étudiant. Il est possible d'envisager à la fois une carrière dans l'enseignement et la recherche ou bien dans l'industrie.

Références bibliographiques sur le sujet de thèse :

B. A. Francis and W. M. Wonham, "The internal model principle of control theory," *Automatica*, vol. 12, no. 5, pp. 457-465, 1976.

G. Hillerström and K. Walgama, "Repetitive Control Theory and Applications - A Survey," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 29, no. 1, pp. 1446-1451, 1996.

M. Steinbuch, "Repetitive control for systems with uncertain period-time," *Automatica*, vol. 38, no. 12, pp. 2103-2109, 2002.

V. Léchappé, S. Rouquet, M. A. González, F. Plestan, J. De León, E. Moulay and A. Glumineau, "Delay Estimation and Predictive Control of Uncertain Systems With Input Delay : Application to a DC motor", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(9), pp. 5849-5857, 2016

V. Léchappé, Q.-L. Han, M. Cirrincione, "Approximation of Disturbance Dynamics by an Extended State Observer Using an Artificial Delay," submitted to *Conference On Decision and Control*, 2019

K. Zhang, Y. Kang, J. Xiong, and J. Chen, "Direct repetitive control of SPWM inverter for UPS purpose," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 784-792, 2003.